

# 超高真空化学气相淀积法生长的 $n\text{-Si}/i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}/n\text{-Si}$ 结构的 透射电镜和二次离子质谱分析

张进书 金晓军 钱佩信

(清华大学微电子学研究所 北京 100084)

罗台秦

(香港科技大学电机与电子工程系 香港)

**摘要** 本文用透射电镜(XTEM)和二次离子质谱(SMS)分析了由超高真空化学气相淀积法(UHVCVD)生长的 $n\text{-Si}/i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}/n\text{-Si}$ 结构,发现在硅上外延生长 $i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}$ 时,在靠近Si的 $i/\text{p}^+ \text{SiGe}$ 界面处存在一个很薄的层,但在 $i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}$ 上外延生长Si时,无此现象产生.此薄层是由在硅上外延生长 $i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}$ 时硼原子聚集在靠近Si的 $i/\text{p}^+ \text{SiGe}$ 界面处形成的高掺杂薄层.高掺杂的薄层影响由此结构制备的异质结双极晶体管(HBT)的BC结的正向导通电压.

EEACC: 2520M, 2530, 2550B, 0590

## 1 前言

自UHVCVD生长的SiGe HBT器件问世以来,UHVCVD已逐步发展成为一种具有广阔发展前途的外延生长方法<sup>[1,2]</sup>. SiGe HBT以其独特的优点,如高发射效率,低基区电阻,以及优良的高频性能等,受到人们的极大关注<sup>[3,4]</sup>. A. Schuppen等人报道了最高振荡频率为160 GHz的SiGe HBT<sup>[5]</sup>, K. D. Hobart等人报道了S波段输出功率200W的SiGe HBT<sup>[6]</sup>. 而器件的这些高性能是与SiGe材料密切相关. 本文用XTEM和SMS对由UHVCVD生长的 $n\text{-Si}/i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}/n\text{-Si}$ 结构进行了研究.

## 2 实验和讨论

### 2.1 $n\text{-Si}/i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}/n\text{-Si}$ 结构的生长

本文的 $n\text{-Si}/i\text{-p}^+ \text{-i SiGe}/n\text{-Si}$ 结构是在台湾交通大学毫微米元件实验室由UHVCVD法生长的. 此UHVCVD系统由一个水冷的不锈钢生长室和一个装片室,气路系统和计算机控制组成. 生长室有抽速为1000 l/s的涡轮分子泵抽真空,本底真空为 $2.7 \times 10^{-8}$  Pa. 在外

张进书 博士生,主要从事SiGe材料及其HBT的研究  
金晓军 博士后,主要从事SiGe材料的生长及其器件的研究  
1997-11-11收到,1998-01-15定稿

延生长过程中生长室真空由涡轮分子泵维持在 0.13Pa 所用气体为纯  $\text{SiH}_6$ ,  $\text{GeH}_4$  和  $\text{H}_2$  稀释的 0.1% 的  $\text{B}_2\text{H}_6$  和 1% 的  $\text{PH}_3$   $n\text{-Si}/i\text{-p}^+\text{-i SiGe}/n\text{-Si}$  结构在生长室中连续外延生长完成, 其中 SiGe 层的生长温度为 550 . 具体的生长过程见参考文献[7].

## 2.2 SMS 分析

图 1(见图版 D)为由 UHV CVD 法外延生长的  $n\text{-Si}/i\text{-p}^+\text{-i SiGe}/n\text{-Si}$  结构的二次离子质谱, 其中  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  层的厚度分别为 7.5/30/7.5 nm, Ge 含量为 16%.

可以看出 Ge 原子在 SiGe 层中均匀分布, 而在靠近  $n\text{-Si}$  衬底的 SiGe 层中存在一个 B 的高掺杂薄层, 且其位置处在  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  界面. 由于硅锗之间存在较大的晶格失配 ( $\sim 4\%$ ), 所以在 Si 上外延生长 SiGe 时会产生应力, 其中 SiGe 层中的应力为压应力. 在外延生长  $n\text{-Si}/i\text{-SiGe}$  后,  $i\text{-SiGe}$  层中产生压应力.  $\text{B}_2\text{H}_6$  通入反应室开始  $\text{p}^+\text{-SiGe}$  外延生长时, 由于  $i\text{-SiGe}$  层中的压应力作用, B 原子聚集在  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  界面处, 从而减小由 Si 上外延生长 SiGe 时产生的压应力.

## 2.3 XTEM 分析

图 2(见图版 D)为由 UHV CVD 法外延生长的  $n\text{-Si}/i\text{-p}^+\text{-i SiGe}/n\text{-Si}$  结构的横截面透射电镜(XTEM)照片, 其中  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  层的厚度分别为 7.5/30/7.5 nm, Ge 含量为 16%.

我们可以看出在  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  界面处存在一个非常薄的层, 且其颜色相对 SiGe 层较黑. 对比 SMS 和 XTEM 结果可以看出, 此薄层就是 B 高掺杂的薄层. B 高掺杂的薄层在 XTEM 照片中颜色相对非高掺杂 SiGe 层较黑, 可能是由于电子受 B 高掺杂处的应力场作用的结果.

## 2.4 SiGe HBT 的 BE, BC 结正向特性

SiGe HBT 采用台面结构, 同参考文献[8]. 用 HP4155 半导体参数测试仪测量 SiGe HBT 的 BE, BC 结正向特性, 如图 3 所示.

当  $i\text{-SiGe}$  层由 10nm 变为 7.5nm 而 Ge 含量保持为 16% 时, B 高掺杂的 SiGe 层移近 BC 结, 使得 BC 结的正向导通电压由  $\sim 0.6\text{V}$  变为  $\sim 0.2\text{V}$ ; 当  $i\text{-SiGe}$  层厚度保持为 7.5nm 而 Ge 含量由 16% 变为 10% 时, B 高掺杂的 SiGe 层位置保持不变, 但是 B 高掺杂区的浓度将会降低 (由于随着 Ge 含量的减小, Si 上外延 SiGe 时 SiGe 中产生的压应力降低), 从而使得 BC 结的正向导通电压由  $\sim 0.2\text{V}$  变为  $\sim 0.4\text{V}$ . 从图 3 的 BE 结正向特性可以看出, 不论  $i\text{-SiGe}$  层的厚度发生变化, 还是 Ge 的含量发生变化, 其正向导通电压保持不变 ( $\sim 0.6\text{V}$ ). 因此  $n\text{-Si}$  上外延  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  时, 由于 SiGe 中产生压应力, 从而引起 B 原子聚集在  $i\text{-p}^+\text{-i SiGe}$  界面处, 严重影响 SiGe HBT 的 BC 结正向特性.

## 3 结论

用截面透射电镜和二次离子质谱分析了由超高真空

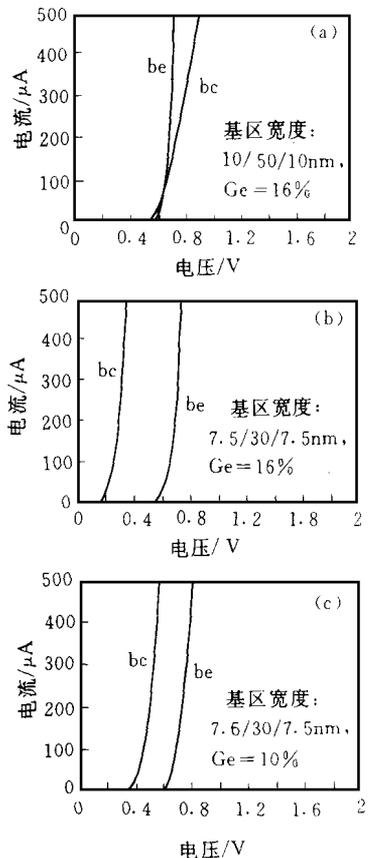


图 3 SiGe HBT 的发射结、集电结正向特性

化学气相淀积法生长的  $n\text{-Si}/i\text{p}^+\text{-i SiGe}/n\text{-Si}$  结构 在硅上外延生长  $i\text{p}^+\text{-i SiGe}$  时, SiGe 中产生压应力, 从而引起 B 原子聚集在  $i\text{p}^+\text{ SiGe}$  界面处形成一层非常高掺杂的薄层 高掺杂的薄层影响由此结构制备的异质结双极晶体管的 BC 结的正向导通电压

**致谢** 本文中的二次离子质谱分析得到清华大学电子工程系查良镇教授的帮助, 在此深表感谢

### 参 考 文 献

- [ 1 ] S. S. Iyer, G. L. Patton, J. M. C. Stork *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1989, **ED-36**: 2043
- [ 2 ] G. L. Patton, D. L. Harame, J. M. C. Stork *et al* , IEEE Electron Device Lett , 1989, **EDL-10**: 534
- [ 3 ] E. Kasper, H. Kibbel, H. J. Herzog *et al* , Jpn. J. Appl Phys , 1994, **33**: 2415
- [ 4 ] F. Sato, T. Tatsumi, T. Hashimoto *et al* , IEEE Trans Electron Devices, 1994, **ED-41**: 1373
- [ 5 ] A. Schuppen, U. Erben, A. Gruhle *et al* , 1995 IEDM Dig , 743
- [ 6 ] K. D. Hobart, F. J. Kub, P. E. Thompson, IEEE Trans Microwave Theory and Techniques, 1996, **44**: 2392
- [ 7 ] L. P. Chen, G. W. Huang and C. Y. Chang, Appl Phys Lett , 1996, **68**: 1498
- [ 8 ] C. A. King, J. L. Hoyt and J. F. Gibbons, IEEE Trans Electron Devices, 1989, **ED-36**: 2093

## Transmission Electron Microscopy and Secondary Ion Mass Spectrometry Study of $n\text{-Si}/i\text{p}^+\text{-i SiGe}/n\text{-Si}$ Structures Grown by Ultra High Vacuum Chemical Vapor Deposition

Zhang Jinshu, Jin Xiaojun, Tsien Pei-hsin

(Institute of Microelectronics, Tsinghua University, Beijing 100084)

Lo Tai-chin

(Department of Electrical and Electronic Engineering, Hong Kong University of Science and Technology, Hong Kong)

Received 11 November 1997, revised manuscript received 15 January 1998

**Abstract**  $n\text{-Si}/i\text{p}^+\text{-i SiGe}/n\text{-Si}$  structures grown by ultra high vacuum chemical vapor deposition are investigated by transmission electron microscopy and secondary ion mass spectrometry. It is found that a very thin layer exists at the interface of  $i\text{p}^+\text{ SiGe}$  closer to the Si substrate when  $i\text{p}^+\text{-i SiGe}$  is grown on Si, and this phenomenon does not occur when Si is grown on  $i\text{p}^+\text{-i SiGe}$ . This thin layer is heavily boron doped due to the accumulation of boron atom at the interface of  $i\text{p}^+\text{ SiGe}$  closer to the Si substrate. As a result, the turn-on voltage of the BC junction of the SiGe HBT made from this structure was affected seriously.

**EEACC:** 2520M, 2530, 2550B, 0590